

缓/控释肥料的研究进展

徐玉鹏¹, 赵忠祥¹, 张夫道², 刘俊斌³

(1. 河北省沧州市农林科学院, 河北 沧州 061001; 2. 中国农业科学院土壤肥料研究所, 北京 100081; 3. 河北省南运河管理处, 河北 沧州 061001)

摘要: 为了提高化肥利用率及减少环境污染, 目前缓/控释肥料的研究成为化肥研究的热点。对缓/控释肥料的类型、养分释放特性的评价方法及应用缓/控释肥所带来的生态、经济和环境效应进行了阐述, 并指出了缓/控释肥料目前存在的问题及未来研究发展方向。

关键词: 缓/控释肥料; 控释材料; 控释机理; 肥效

中图分类号: S14 文献标识码: A 文章编号: 1000-7091(2007)增刊-0190-05

Advances in Development and Application of Controlled-release Fertilizers

XU Yu-peng¹, ZHAO Zhong-xiang¹, ZHANG Fu-dao², LIU Jun-bin³

(1. Agricultural and Forest Academy of Cangzhou, Cangzhou 061001, China;

2. Soil and Fertilizer Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

3. Administrant Office of South Canal of Hebei Province, Cangzhou 061001, China)

Abstract: In order to improve utilization of fertilizer and to reduce environmental pollution, nowadays controlled-release fertilizer has become a focus in fertilizer research in China and abroad. A systematic classification of slow and controlled release fertilizers and details about the mechanisms of nutrient release are given in this paper. The ecological, economic and environmental effects which are brought by application of slow and controlled release fertilizer are reviewed in this paper. Finally, the problems and directions in controlled release fertilizer production and practice are discussed.

Key words: Controlled-release fertilizer; Controlled-release material; Controlled release mechanism; Fertilizer effect

肥料是主要的农业生产资料之一。施肥, 无论是在发达国家还是发展中国家都是最快、最有效、最重要的增产措施。联合国粮农组织(FAO)的统计表明, 在发展中国家施肥可提高粮食作物单产 55%~57%, 总产 30%~31%。我国由于化肥使用和研究起步较晚, 加之经济和技术原因, 化肥利用率不高, 氮肥当季利用率为 30%~35%, 磷肥为 10%~20%, 钾肥为 35%~50%, 低于发达国家 15~20 个百分点^[1]。为了提高化肥利用率, 我国肥料科技工作者在施肥技术上做了大量的研究和推广, 例如: 有机和无机肥料配合施用技术, 平衡施肥技术, 化肥深施和按作物生育期分次追施氮肥技术等。这些农艺措施虽然在农业生产中对提高化肥利用率起到了一定的成效, 但单纯农艺措施的作用是有局限性的, 不能从根本上解决化肥利用率低的问题。因此, 除了继续研究高效施肥技术之外, 必须工艺与农艺相

结合, 研究肥料的新剂型, 将平衡施肥技术提高到一个新阶段, 使肥料养分的释放速率与作物需肥规律相吻合, 才能大幅度提高肥料利用率。缓/控释肥料这一高新技术为解决化肥利用率低的问题提出了新的思路和途径。理想中的缓/控释肥料是指能够根据作物生长需要而将养分释放出来的新型肥料。因此, 20 世纪 80 年代以来缓/控释肥料已成为化肥研究的热点。

1 国内外研究及应用现状

1.1 研究应用现状

缓/控释肥料于 20 世纪 40 年代末在美国开创, 日本、加拿大、德国、以色列、印度、埃及等对肥料的控释都作了较多的研究, 各具特色, 并形成了各自的产品。到 90 年代中期, 控释肥料的全球年产量已达 50 万 t, 其中, 美国是最大的生产消费国。目前, 美

国和日本在控释肥料的理论和应用领域居世界领先地位^[3-5]。早在 1974 年,中国科学院南京土壤所就开展了包膜缓释肥料的研究,自此,控释肥料开始在我国的高等院校和科研院所相继开展起来,并形成了相应的产品^[6]。尽管控释肥料具有潜在的经济及社会效益,然而,现有的控释肥料在控释机理、控释条件、释放周期和控释材料等方面还存在不少问题,因此,价格居高不下,很难实现在大田的推广应用,大多数控释肥料用于草坪、苗圃和花卉等园艺作物^[3,8,9]。因此,许多科技工作者正在对控释材料和控释机理开展更深入的研究工作,随着控释材料的筛选和生产工艺的成熟,其价格会进一步下降,使用范围也必将会进一步扩大。

1.2 缓/控释肥料的类型

根据缓释材料和加工方式的不同,大致分为二种类型:包膜型肥料、化学抑制型肥料。

1.2.1 包膜型肥料 包膜肥料由包裹膜和肥料心组成。肥料心常用的是普通 N, P, K 单元或多元肥料、含微量元素的复合肥料、含有植物所需营养元素的矿物等。作为肥料心的这些肥料水溶性好,易于被植物吸收,但也容易流失和浪费,特别是在经常灌溉的田块,这种现象更为严重,因而人们通常在这些肥料的外面包裹上一层膜来阻止或延缓上述现象的发生,从而形成了包膜肥料。美国最早先后进行了包硫氯化钾(SCK)、包硫磷酸二铵(SCP)、“控释农药-肥料聚合物”包膜肥料的研究。日本在研究初期学习美国的技术,从 20 世纪 70 年代开始研制热塑性树脂聚烯烃包膜肥料。该包膜剂是由聚烯烃(PE)-乙烯和乙酸乙烯酯的共聚物(Ethylene vinylacetate, EVA)和无机填充料滑石粉所组成。PE 可形成水渗透性很低的薄膜,而 EVA 能形成水渗透性很强的薄膜。将 PE 与 EVA 按不同的比例混合,便能控制氮的释放速率,添加滑石粉可以调节包膜肥养分释放的温度系数。在众多的日本专利中^[8,9],以开发可被生物和光降解的聚合物包膜肥料及具有不同养分释放模式的包膜肥料为主体。包膜肥料所用的包裹膜常是一层难溶物或者微溶物。当肥料施入土壤后,包裹膜发生缓慢地溶解、分解或腐化,肥料心暴露,通过土壤中的水分,使肥料被植物缓慢吸收,从而达到缓释的目的。常用的包膜材料可分为:

天然高分子材料:包括淀粉及其衍生物,动植物胶类,植物蜡和蜂蜡等^[10]。

半合成高分子聚合物:纤维素类,淀粉衍生物,黄化木质素,脲甲醛等。

合成高分子聚合物:聚烯烃类热塑性树脂,聚丙

稀醇,聚乙烯塑料,泡沫硬塑料,乙烯树脂,丙烯酸树脂等。

混配或改性的高分子聚合物:淀粉及其衍生物与树脂混配并改性。

无机化合物:无机化合物作为包裹膜有硫磺、 $MgNH_4PO_4 \cdot 3H_2O$ 、硅酸盐、磷酸钙、 P_2O_5 /CaO 玻璃体以及改性氧化物 Al_2O_3 制成的无机物束胶。

1.2.2 化学抑制型肥料 该肥料目前主要向两种类型发展,一种是添加脲酶抑制剂和硝化抑制剂,调节土壤微生物的活性,减缓尿素的水解和对氨态氮的硝化-反硝化作用,从而达到肥料氮素缓慢释放和减少损失的目的^[11,12];另一类是用土壤调理剂包膜,如乙酸乙烯酯和聚丙烯酰胺共聚物(EVA)既是较好的土壤调理剂,又是较好的肥料包膜剂,通过改变微环境,提高肥料利用率。

1.3 缓/控释肥料养分释放特性的评价

控释肥自 20 世纪 40 年代问世以来,人们即开始研究其控释性能的评价方法。Oertli 等^[13]以水和磷酸盐缓冲液连续浸提树脂包膜肥料以测定养分溶出率,此后,许多学者在这方面进行了探索。但由于各种控释肥的控释材料、控释途径、控释机理不同,至今还没有统一的、标准的评价方法。

1.3.1 水中溶出率法 欧洲标准委员会(Comite Europeen de Normalisation, CEN)规定缓释肥料(TC260/WG4/TFsrF)在水中(25℃)养分释放速率 24 h 不大于 15%;28 d 不超过 75%;在规定的时间内至少有 75% 被释放^[14]。Blouin 等^[15]1971 年提出的 7 d 溶出率法则是硫包膜尿素(SCU)和聚合物包膜尿素控释性能的常用测定方法,该法是将 50 g 肥料样品没入 250 mL 水中(肥水比为 1:5,温度 25℃左右),7 d 内,每天测定尿素浓度以确定养分释放速率。而日本对包膜肥料则采用初级溶出率法和微分溶出率法来评价缓释性能^[16]。方法是称取 12.5 g 肥料样品,加入 250 mL 水(肥水比为 1:20),于 30℃恒温箱中放置 24 h,测定浸取滤液中铵态氮,水溶性磷和水溶性钾的含量。初级溶出率即溶解的养分量占肥料中全量养分的百分含量。若把肥料样品按同样的肥水比例在 30℃恒温箱中放置 7 d(168 h),测定溶出的养分量,即可得到第 1 至第 7 天之间的养分每天平均溶出率,即微分溶出率。微分溶出率(%) = $[(\text{累积养分溶解量} \times 100 / \text{试样中养分含量}) - \text{初级溶出率}] \times [1 / (\text{放置天数} - 1)]$ 。初级溶出率反映那些包膜不完整的肥料粒子数量,通常要求初级溶出率不大于 40%;微分溶出率是评判包膜完整的肥料粒子,平均每天释放总养分百分率,大多数包膜缓释

肥料微分溶出率为 0.25%~2.5%。事实上,许多控释肥生产企业则各有评价肥料性能的快速测定方法。例如美国 Scotts 公司、Puresell 工业公司、以色列 Haifa 化学公司以肥料养分在水中(21℃)释放 80% 作为聚合物包膜肥料 Osmocote, Polyon, Multicote 的评判标准;而日本 Chisso-Asahi 肥料公司则以释放 75%(25℃)作为聚合物包膜肥料 Nutricote, Meister 的评判标准。中国郑州乐喜施肥料公司则以肥料浸入水中不同时间尚有核心的颗粒数目作为评价 Luxt-riance 和 Luxacote 的生产线控制标准,以 48 h 水中(25℃)溶出率小于 60% 作为企业标准^[17]。

静态水中溶出率法没有考虑土壤水分实际上是各种养分离子的盐溶液,而且随着养分的溶出,盐分浓度增大,必然会影响养分离离子通过包膜的迁移。Oertli 和 Lunt 用含 0.005 mol/L 的 NaCl 磷酸盐缓冲液于 21℃ 下连续 9 周浸提含 10 g 不同树脂包膜厚度的 KCl 肥料,并以滤过 CO₂ 的空气通气以搅拌溶液(防止 CO₂ 溶入),每周更换浸提液并测定释放出的钾量。结果表明,钾的释放速度受包膜厚度影响很大。熊又升等^[18,19] 用巴氏滤管法、段平用沙柱法,采用上端淋水,下端收集滤液,检测一定时间内滤液中的养分含量,均收到满意的效果。

1.3.2 土壤溶出率法 肥料浸入水中或某种盐的缓冲溶液中测得的养分释放速率和释放期远不能代表控释肥料对作物的供肥速率和肥效期。因为溶解的肥料养分除少部分被作物直接吸收利用外,大部分在土壤中会发生一系列物理、化学和生物学变化,各种形态的养分之间建立起动态平衡,较长时间地供作物利用。因此,肥料肥效期远大于肥料养分在水或溶液中的释放期。因此,一些学者引入土壤因子,来评价控释肥的养分释放特性。

Oertli 和 Lunt 把 1 kg 的土壤与 30 g 树脂包膜肥料混匀,装入长 60 cm、内径 5 cm 的垂直玻璃管中,玻璃管底部装一些玻璃棉,通过玻璃棉过滤。连续 10 周,每次分别用 50 mL 蒸馏水和 2% 或 0.5% 的甲醛溶液(开始为 2%,以后为 0.5%,主要目的在于杀死土壤微生物)淋洗土壤肥料混合物,收集淋洗液并测定其中的养分含量。应用土柱淋洗法的最大缺点是其长短影响土壤持水量,较短土柱单位容积持水量一般大于较长土柱。Holcomb^[20] 提出的方法则可克服这个缺点:在装有泥炭-蛭石等体积混合物的容器底部放置一个毛细管垫子,每次淋洗只使混合物被水饱和,而不产生淋出液,这样肥料中释放的养分离离子通过扩散作用进入垫子,定期挤压垫子以提取并测定养分含量。侯翠红^[21] 也用类似装置测定

了 Osmocote(13-12.92-15.29) 肥料中钾的溶出率,并进一步扩展到 Luxecote(18-6-12) 肥料中氮素的测定。模拟土壤与实际土壤仍有区别,因此 Paramasivam 等利用土柱以养分淋失-干燥(培养)方式模拟田间条件比较了 Meister、Poly-S(聚合物包硫尿素)和 Osmocote 的养分释放及淋溶特性。杜建军等^[22] 按照田间耕层实际容重建造土柱,以模拟雨水连续 5 周淋溶,评价不同控释肥料在土壤中的养分释放与淋溶特性,其结果与盆栽试验一致。

土柱淋洗法仍局限在实验室条件下,一些学者采用肥包法:将肥料(或与沙子混合后)装入尼龙网袋埋在土壤中,过一段时间取一些肥料颗粒分析其中的养分含量以确定养分释放速率^[23]。这种方法的困难在于:如何确定合适的网袋大小、装入肥料的多少及肥包在土壤中的分布:肥料在网袋中会破裂,甚至粉化,因而试验误差较大。

1.3.3 同位素示踪法 Shoji 等^[24,25] 应用¹⁵N 标记技术研究了 POCU-70(Polyolefin-cote urea 聚烯烃包膜尿素,70 d 表示养分释放天数)在田间条件下氮素释放特性和玉米吸收利用关系。结果发现,10~30℃ 范围内 POCU 累积释放氮量与时间、气温或土壤积温的关系可用一元二次方程表示:(1) $CNR = a + b(\text{day}) + c(\text{day})^2$ (2) $CNR = a + b(CT) + c(CT)^2$ 式中 CNR 为累积氮素释放率(%);day 为时间(d);CT 为空气或土壤积温(℃);a, b, c 为常数。POCU 施入土壤后开始氮素释放较快,但随着时间的推移释放率逐渐降低,大约在 126 d 或气温积温达到 2300℃ 时(成熟期),累积释放率达到 80%。另一方面,玉米对氮素的吸收曲线符合典型的“S”曲线,证明 POCU 释放的氮素可以满足玉米整个生育期的需求同位素示踪法能够较真实反映田间实际情况,但是该法成本高,而且需要特殊的仪器,一般实验室难以完成。

1.3.4 重量法 Gambash 等^[26] 则认为,水蒸气通过膜的扩散进入肥料颗粒内部是肥料释放速度的决定步骤。他设计了一种以重量法测定水蒸气扩散量的方法,从而评价包膜肥料的控释性能。方法是:取 10~30 粒颗粒肥料放在已称重的滤纸上,然后把肥料连同滤纸放入一底部盛水上部被水蒸气饱和的干燥器改装的容器中,定期称量肥料颗粒及滤纸重量,根据重量变化来确定养分的释放速率。这一方法所得的结果与测定土壤-肥料混合物中养分释放速率所得结论是一致的,该法的优点是对评价肥料颗粒的单个行为特别有效。

1.3.5 电超滤法 近年来一些研究者把电超率(Electroultrafiltration, EUF) 技术应用于评价控释肥控

释性能^[27]。Diez 等确定了 EUF 用于控释肥评价的工作条件: EUF-N I: 30 min, 200 V, 20℃, 15 mA; EUF-N II: 5 min, 400 V, 20℃, 40 mA 和 5 min, 400 V, 20℃, 150 mA。Vallejo 等对木素包膜尿素研究后指出 EUF-N I 可以表征养分释放的数量, 而 EUF-N II 则与包膜的稳定性有关。EUF-N I 和 EUF-N II 均随膜厚度的增加而下降, 它们的值与水中溶出率模型中速度常数高度相关。生物试验表明, 黑麦草吸氮量、氮素淋失量和可溶性氮(吸收+ 淋失) 均与 EUF-N I, EUF-N (I+ II) 达显著或极显著的相关性, 而与 EUF-N II 均达极显著水平的相关性, 说明利用 EUF 技术不仅可以提供肥效方面的信息, 还可以反映氮素淋失情况, 是一个值得深入研究的方法。

1.4 缓/控释肥料实际应用效果

由于控释肥料体现了纵向- 横向平衡施肥的原理, 因而提高了肥料的利用率, 可以说具有显著的经济效益、环境效益。

研究表明^[28, 29], 水稻一次性基施控释肥料与传统水稻栽培成本相比, 可降低成本 65%。氮淋失与植物吸收对比评价试验显示, 包膜氮肥在减少氮淋失, 促进植物生长及增加植物组织含氮量方面均优于非包膜氮肥, 同时使用控释肥料是减少环境危害和维持高养分使用效率的潜在手段。

试验表明^[30- 33]: 在小麦、土豆、玉米、棉花上施用控释肥能显著提高氮肥的利用率及作物的产量, 在玉米试验中, 控释肥的 N₂O 损失仅仅是尿素损失的 1/3, 整个生育期 N₂O 的损失均远远低于传统肥料, 同时控释肥 MESTER 氮的植物回收率几乎是尿素的 2 倍。整个试验系统中¹⁵N 回收率是控释肥的最高, 控释肥的氮损失平均仅为 1.9%。随之作者指出控释肥能保持空气、水的质量得益于它能最大地提高氮肥的利用率, 减少氮的损失。据测算, 在中国, 若所使用尿素中的 1% 由 Luxecote 组成, 氮的损失可减少 10%, 1 千亿 m³ 的地下水供应中 NO₃⁻ 的浓度可能降至 3 mg/L, 环境效益相当明显。

俞巧钢等^[34]以脲甲醛、尿素、过磷酸钙和氯化钾为原料, 造粒后用脲醛涂膜液包膜加工而成的控释肥料在柑桔上应用表明, 比普通肥料增产 12%~ 26%, 同时柑桔的品质也得到改善。

2 存在问题及研究发展趋势

由于控释材料, 生产工艺的复杂, 致使控释肥料价格居高不下, 一般为普通肥料的 2~ 3 倍。为了降低控释肥料的价格, 研制和筛选新型、高效、廉价的控释材料已成为目前研究的关键^[35, 36]。现在控释

材料的研究已逐渐从无机物转向有机物, 将纳米材料作为胶结包膜材料应用于缓控释肥也将成为这一领域的研究热点^[37]。

不同控释材料包膜的肥料释放机理是不同的, 不同形态的养分在不同土壤、不同作物上的转移吸收差异也很大。正是由于这一差异的复杂性, 有必要通过物理或化学手段, 按照作物生长期, 将不同类型的缓/控释肥料进行混配, 形成 2 个或数个养分释放高峰, 与作物需肥规律相吻合。

由于氮素在土壤中淋溶、挥发等损失极大, 因而目前控释肥料的研究主要集中在氮肥的控释上, 但也有必要加强对磷、钾甚至部分中、微量元素控释的研究。目前磷主要以水溶性磷肥与尿素形成包膜控释肥, 钾肥主要以氯化钾、硫酸钾的包膜形式出现, 不过这方面的报道并不多, 开发控释型磷、钾、部分中、微量元素肥料, 在某种程度上使控释肥料的意义更为完全准确。

缓/控释肥料控释性能的测试方法虽有很多报道, 但是, 各种测试方法因采用的介质、仪器不同, 预测控释肥控释性能的准确度大不相同。此外, 实验室测定参数与田间控效肥控释期限和效果缺乏相关研究, 因而建立控效肥控释性能标准测试方法势在必行。

参考文献:

[1] 杜昌文, 周健民. 控释肥料的研制及其进展[J]. 土壤, 2002(3): 127- 133.

[2] 许秀成, 李平. 包裹型缓/控释肥料释放专题报告. 第 2 报, 世界缓释/控制释放肥料生产、消费现状[J]. 磷肥与复肥, 2000b, 15(4): 5- 7.

[3] 许秀成, 李平. 包裹型缓/控释肥料释放专题报告. 第 3 报, 包膜(包裹)型控制释放肥料各国研究进展: 1. 美国、加拿大; 2. 日本[J]. 磷肥与复肥, 2000c, 15(6): 7- 12.

[4] 许秀成, 李平. 包裹型缓/控释肥料释放专题报告. 第 3 报, 包膜(包裹)型控制释放肥料各国研究进展, 3. 欧洲[J]. 磷肥与复肥, 2001a, 16(2): 10- 12.

[5] 许秀成, 李平. 包裹型缓/控释肥料释放专题报告. 第 3 报. 包膜(包裹)型控制释放肥料各国研究进展, 4. 中国[J]. 磷肥与复肥, 2001b, 16(2): 10- 12.

[6] 张平, 索滨华, 杨晓光. 缓释肥料在苗木生产上的应用[J]. 吉林农业大学学报, 1996, 18(1): 46- 50.

[7] 梁智, 何生丽. 矿物包裹型缓释肥料肥效研究[J]. 新疆农业科学, 2002, 39(6): 360- 361.

[8] Central Glass Co Ltd Controlled-release fertilizer[P]. Japan Patent: JP 5935874, 1984- 08- 31.

[9] Central Glass Co Ltd, Coating materials for controlled-release

- fertilizers[P]. Japan Patent: JP59 35875[84 35875], 1984–08–31.
- [10] Song M Y S. The controlled release matrixtype fertilizer and the process of preparation therefore [P]. World Intellectual Property Organization Patent: W O 96 18591, 1996–01–20.
- [11] 孙来九. 缓效氮肥的研制及应用[J]. 化肥工业, 1979, 6: 58–61.
- [12] 吴平霄, 廖宗文. 高表面活性矿物——类新型的控释材料[J]. 磷肥与复肥, 2000, 15(7): 62–63.
- [13] Oertli J J, Lunt O R. Controlled release of fertilizer minerals by encapsulating membranes: I Factors influencing the rate of release[J]. Soil Sci Soc Am Proc, 1962, 26: 579–583.
- [14] Trenkel M E. Controlled release and stabilized fertilizers in agriculture[J]. International Fertilizer Industry Association, Paris, 1997: 11.
- [15] Christianson C B. Factors affecting N release of urea from reactive layer coated urea[J]. Fert Res, 1988, 16: 273–284.
- [16] 山田文雄, 越野正义, 藤井国博, 等. 肥料分析方法详解(修订版) [M]. 韩辰极, 付玉振等译. 北京: 化学工业出版社, 1983: 483–486.
- [17] 许秀成, 李平. 包裹型缓/控释肥料释放专题报告第 1 报 概念区分及评判标准[M]. 磷肥与复肥, 2000a, 15(3): 1–6.
- [18] 熊又升, 张行峰, 熊桂云, 等. 包膜缓释肥料养分释放速率评价方法的探讨[J]. 磷肥与复肥, 1999, 14(10): 21–22.
- [19] 段平. 缓效多营养包硫尿素氮溶出速率的试验研究[J]. 磷肥与复肥, 2000, 15(2): 21–22.
- [20] Holcomb E J. A technique for detemining potassium release from a slow release fertilizer[J]. Comm Soil Sci Plan Anal, 1981, 12: 271–277.
- [21] 侯翠红. 控制释放肥料养分释放特性的研究[J]. 磷肥与复肥, 1998, 13(4): 6–8.
- [22] 杜建军. 包膜控释肥养分释放特性评价方法的研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(1): 16–21.
- [23] Sanvant N K. A technique for predicting urea release from coated urea in wetland soil[J]. Comm Soil Sci Plan Anal, 1982, 13: 793–802.
- [24] Shoji S, Gandeza A T, Kimun K. Simulation of response to polyolefin coated urea: II Nitrogen uptake by corn[J]. Soil Sci Soc Am J, 1991, 55: 1468–1473.
- [25] Shoji S, Kanno H. Use of polyolefin-coated fertilizers for increasing fertilizer efficiency and reducing nitrate leaching and nitrous oxide emissions[J]. Fert Res, 1994, 39: 147–152.
- [26] Gambash S, Kochba M, Avimelech Y. Study on slow-release fertilizers: II A method for evaluation of nutrient release rate from slow-releasing fertilizers[J], Soil Sci, 1990, 150(1): 446–450.
- [27] Cartagena M C, Diez J A, Aallejo A, *et al.* Valuation and classification of coated slow-release nitrogen fertilizers by means of electroultrafiltration in an integrated system[J]. Agric Med, 1993, 123: 122–127.
- [28] 正圣先, 肖剑, 易国英. 控释肥料养分释放动力学及其机理研究. 第 2 报, 水蒸气对包膜型控释肥料养分释放的影响[J]. 磷肥与复肥, 2002, 17(522–25): 14–17.
- [29] 黄科延, 戴平安. 早稻施用控释氮肥的效果[J]. 湖南农业大学学报, 2002, 28(1): 12–15.
- [30] Kaneta Y, Awasaki H, Murai T. The notillage rice culture by single application of fertilizer in a nursery box with controlled-release fertilizer[J]. Jap J Soil Sci Plant Nutr, 1994, 65: 385–391.
- [31] 全云飞, 龚佩珍. 棉花专用包膜肥应用试验初报[J]. 江苏农业科学, 1996(2): 42–43.
- [32] 张春伦, 朱兴明, 胡思农. 缓释尿素的肥效及氮素利用率研究[J]. 土壤肥料, 1998(6): 17–20.
- [33] 阎翠萍, 陈爱苹, 鲁晋秀, 等. 特旱年旱地小麦缓释肥的增产效应[J]. 山西农业科学, 2001, 29(3): 37–40.
- [34] 俞巧钢, 朱本岳, 叶雪珠. 控释肥在柑桔上的应用研究[J]. 浙江农业学报, 2001, 13(4): 210–213.
- [35] 何绪生, 李素霞. 控释肥料的研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(2): 97–106.
- [36] 黄立章, 石伟勇, 吴建富. 控释肥料的研究动态与展望[J]. 浙江农业大学学报(自然科学版), 2002, 24(5): 727–730.
- [37] 张夫道, 赵秉强, 张骏, 等. 纳米肥料研究进展与前景[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 254–256.